

복사 장치를 이용한 온도와 형상계수의 변화에 따른 방사율에 관한 실험적 연구

Experimental Study of Emissivity with the Variation of Temperature and Shape Factor Using the Radiation Apparatus

김 청 래^{*} 정 병 철^{**} 강 형 석^{***}
Kim, Chung-Rae Jeong, Byung-Cheol Kang, Hyung-Suk

Abstract

Voltage of radiometer is measured experimentally using the radiation apparatus in each case of iron- and copper-plates as specimen heating device. The length between radiometer and conical shield and the temperature of specimen heating device are considered as variables. The length between radiometer and conical shield controls the amount of radiation from the specimen heating device. Emissivity for both iron-and copper-plates are calculated by using Stefan-Boltzmann equation. One of results shows that emissivity for both materials increases as the length between radiometer and conical shield increases.

키워드 : 열복사, 형상계수, 방사율
Key words : *heat radiation, shape factor, emissivity*

1. 서론

복사는 열전달이 발생하는 데 매체가 필요치 않다는 점에서 전도, 대류의 형태와는 다르다[1]. 복사에 의한 에너지전달은 가장 빠르고 진공 속에서도 감소되지 않는다. 또한 복사열전달은 고체뿐만 아니라 액체와 기체에서도 발생하며 실질적으로 열전달의 세 가지 형태가 복합적으로 일어난다. 그러나 태양에너지가 복사에 의해 지구에 도달하는 것과 같이 진공을 통한 열전달은 단지 복사에 의해서만 일어난다. 복사열전달은 두 물체보다 더 낮은 온도의 매체에 의하여 분리된 두 개의 물체 사

이에서 일어나는데 태양 복사는 높은 고도에서 아주 저온의 공기를 통과한 후 지구의 표면에 도달한다. 진공 속에 있는 물체는 냉각되어 결국에는 주위와 열적 평형을 이루는 것을 알 수 있는데 이러한 냉각은 물체에 저장된 내부에너지의 감소와 연관된다.

열복사란 물체의 유한한 온도에 의하여 방사되는 에너지이다[2]. 지금 이 순간에도 열복사는 우리를 둘러싸고 있는 모든 물체에 방사되고 있다. 열복사의 중요한 성질중 하나는 복사 방사가 온도의 함수로 주어진다는 것이다[3]. 절대온도 이상의 모든 전자, 원자, 고체의 분자 그리고 기체는 항상 운동하고 있으며 따라서 복사는 물질의 모든 체적을 통하여 항상 방사될 뿐만 아니라 흡수되며 투과되고 있다. 즉 복사는 체적현상이다. 그렇지만 금속이나 나무나 바위와 같은 불투명한 고체에 대한 복사는 내부에서 방사된 복사가 표면에 도달할 수 없고 그러한 입사된 복사는 일반적으로 표면으

* 강원대학교 산업대학원 기계공학과, 석사과정

** 강원대학교 대학원 기계공학과, 석사과정

*** 강원대학교 기계공학과 교수, 공학박사

로부터 몇 마이크로온 이내에서 흡수되므로 표면현상으로 취급한다. 표면에 의해 방사되는 열복사는 어떤 범위의 파장이 포함되는데 복사의 크기는 파장에 따라 변화하며 이러한 의존특성을 나타내기 위하여 스펙트럼이라는 용어가 사용되는데 임의의 파장에서의 복사의 크기와 스펙트럼 분포(spectral distribution)는 모두 방사하는 표면의 성질, 온도 그리고 방향성(directionality)과 관계되는데 표면에서의 방사는 어떤 방향을 선호해서 일어나며 따라서 이는 방사된 복사의 방향적 분포(directional distribution)를 갖게 한다.

본 연구에서 실험적으로 측정할 방사율이란 것은 흑체에서 나오는 방사력에 대한 같은 온도에 있는 실제 물체에서 나오는 방사력의 비로서 정의된다[4]. 이러한 방사율은 표면온도, 파장, 방출되는 복사의 방향의 함수이다[5].

이와 같이 열복사는 열전달에 있어 매우 중요하고 흥미로운 과정이기 때문에 본 연구에서는 Fig. 1에서 보여지는 복사 성능 실험기를 이용하여 시편의 온도와 원추차폐부와 복사계 사이의 거리의 함수로서 시편의 방사율(emissivity)을 측정하여 분석하였다.



Fig. 1 Photo of radiator performance tester

2. 이론적 배경

2.1 복사 열전달

열복사(thermal radiation)는 유한 온도의 물체에 의하여 방사되는(emission)에너지이며, 표면에서 방사된 복사는 표면과 접하고 있는 물체의 열에너지로부터 생기고, 단위면적당 방출된 에너지를 표면방사력 (surface emissive power) E 라 하며 흑체의 경우 식 (1)과 같이 나타난다.

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (1)$$

여기서의 표면을 이상적인 복사체(ideal radiator) 또는 흑체(black body)라 한다. 그러나 실제 표면

에서 방사된 열유속은 같은 온도의 흑체로부터의 열유속보다 작고 식(2)와 같이 주어진다.

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2)$$

여기서 ϵ 는 방사율(emissivity)이라 하며 표면의 방사물성값으로 $0 \leq \epsilon \leq 1$ 의 범위를 갖는데 이 물성값은 표면이 흑체에 비하여 얼마나 효과적으로 에너지를 방사하는가를 나타낸다.

복사는 주위로부터 표면에 입사(incident) 될 수도 있으며 표면의 단위면적에 입사하는 모든 복사율을 조사(irradiation) G 라하며 식 (3)과 같다.

$$G_{abs} = \alpha G \quad (3)$$

흡수율(absorptivity) α 는 $0 \leq \alpha \leq 1$ 의 범위를 갖는다. 표면이 회체 ($\alpha = \epsilon$)이고 표면의 온도를 T_s , 주위의 온도를 T_{sur} 이라고 가정하면 표면으로부터의 정미 복사 열전달은 식 (4)와 같다.

$$q''_{sur} = \frac{q}{A} = \epsilon E_b(T_s) - \alpha G = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (4)$$

이 표현은 복사방사에 의하여 방출된 열에너지와 복사 흡수에 의하여 얻은 열에너지 사이에는 차이가 있다는 것을 의미한다.

2.2 형상계수(Shape factor)

형상계수 F_{12} 는 표면 1을 떠나는 복사 중에서 표면 2에 의해 차단되는 분율(Fraction)로 정의된다. F_{12} 에 대한 일반적 표현을 전개하기 위하여 Fig. 2의 임의의 방향을 가지는 표면들 A_1 과 A_2 를 고려한다. 각 표면 위의 요소면적들 dA_1 과 dA_2 는 그 표면법선 n_1 및 n_2 와 각각 극(polar) 각도 θ_1 과 θ_2 를 이룬다.

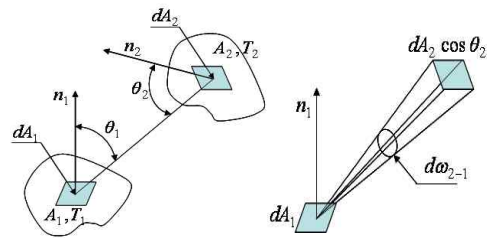


Fig. 2 Shape factor associated with radiation exchange between elemental surface of area dA_1 and dA_2

복사장치를 이용한 온도와 형상계수의 변화에 따른 방사율에 관한 실험적 연구

두 면적사이의 거리 R 과 θ_1, θ_2 의 값들은 A_1 과 A_2 상의 요소면적들의 위치에 따라 변한다. 그러므로 복사강도의 정의로부터 dA_1 를 떠나 dA_2 에 의해 차단되는 복사율은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$dq_{1-2} = I_1 \cos\theta_1 dA_1 d\omega_{2-1} \quad (5)$$

여기서 I_1 은 표면 1을 떠나는 복사강도이고 $d\omega_{2-1}$ 는 dA_1 에서 볼때 dA_2 에 대한 입체각 (solid angle)으로 식 (6)으로 표현된다.

$$d\omega_{2-1} = \frac{\cos\theta_2 dA_2}{R^2} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하면 식 (7)을 얻게 된다.

$$dq_{1-2} = I_1 \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{R^2} dA_1 dA_2 \quad (7)$$

여기에, $J = \pi I$ 을 대입하면, 식 (8)를 얻을 수 있다.

$$dq_{1-2} = J_1 \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi R^2} dA_1 dA_2 \quad (8)$$

표면 1을 떠나 표면 2에 의해 차단되는 전복사율은 두 표면에 대하여 적분하면 얻을 수 있고 식 (9)과 같이 표현된다.

$$dq_{1-2} = J_1 \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi R^2} dA_1 dA_2 \quad (9)$$

여기서 출사 (radiosity) J_1 는 표면 A_1 에 걸쳐서 균일하다고 가정하였다.

형상계수를 A_1 을 떠나서 A_2 에 의해 차단되는 복사의 백분율로 정의하면 $F_{12} = \frac{q_{1-2}}{A_1 J_1}$ 이므로 식 (10)과 같이 정의된다.

$$F_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi R^2} dA_1 dA_2 \quad (10)$$

위에서 얻어진 식을 Fig. 3을 참고로 정리해 보면 식 (10)에서 θ_1 과 θ_2 그리고 R 이 A_1 위에서의 위치에 근사적으로 무관하므로, 이 식은 식 (11)과 같이 쓸 수 있다.

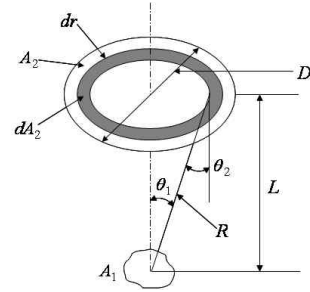


Fig. 3 Areas used to illustrate shape factor relations

$$F_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi R^2} dA_2 \quad (11)$$

여기서, $\theta_1 = \theta_2 = \theta$, $R^2 = r^2 + L^2$, $\cos\theta = \frac{L}{R}$ 그리고 $dA_2 = 2\pi r dr$ 이므로 형상계수는 식 (12)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F_{12} &= 2L \int_0^{D/2} \frac{r dr}{(r^2 + L^2)^2} \\ &= \frac{D^2}{D^2 + 4L^2} = \frac{r^2}{r^2 + L^2} \end{aligned} \quad (12)$$

2.3 방사율(Emissivity)

서모파일의 출력 mV는 그 뒤에 투시된 실복사량에 의하여 결정되며 복사계(radiation system)의 온도는 주위 온도와 같다고 가정하고 서모파일의 온도를 T_R 이라고 한다. 실 복사량은 시편 가열면으로부터 방사된 에너지에서 서모파일로부터 방사된 에너지를 뺀 것과 같다.

여기서 시편 가열면을 회체(gray body) 그리고 서모파일을 흑체(black body)라고 가정하면 식 (13)를 얻는다

$$\begin{aligned} QA_1 &= CE_{mV}(R)A_1 \\ &= \epsilon_2 \sigma F_{21} A_2 T_2^4 - \sigma F_{12} A_1 T_1^4 \end{aligned} \quad (13)$$

상호정리에 의하여 $F_{21} A_2 = F_{12} A_1$ 를 대입하면 시편에서의 방사율이 식 (14)과 같이 나타난다.

$$\epsilon_2 = \frac{CE_{mV}(R)}{F_{12} \sigma T_2^4} + \frac{T_1^4}{T_2^4} \quad (14)$$

여기서 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이며 다음과

같은 값을 갖는다.

$$\begin{aligned} \sigma &= 5.669 \times 10^{-8} W/m^2K^4 \\ &= 4.88 \times 10^{-8} kcal/m^2hK^4 \end{aligned}$$

3. 실험장비 및 실험 방법

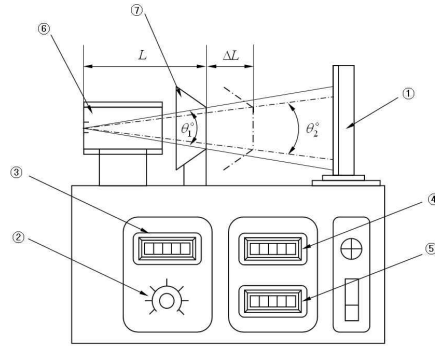
Fig. 4는 복사 실험장비의 개요도를 나타낸다. 본 실험 장치를 이용한 평균 유효 방사율을 구하는 실험 방법은 아래와 같다.

- 1) 육각렌치를 이용하여 시편을 시편가열부 ①의 홈 안에 집어넣는다.
- 2) 차폐부를 복사계와 시편가열부 사이의 원하는 위치에 고정시킨다.
- 3) 온도설정계 ②로 시편 가열부에 원하는 온도를 설정할 수 있는 충분한 양의 전력이 들어가도록 조절한다.
- 4) 디지털 온도 조절계 ④로 원하는 시편가열부의 온도를 설정한다.
- 5) 디지털 온도 조절계 ④의 지시 값이 정상 상태에 도달하기를 기다려 온도지시계 ⑤와 밀리볼트미터 ③의 값이 각각 정상 상태에 도달하도록 한다.
- 6) 각 조절계 및 지시계 ③, ④ 그리고 ⑤의 값이 정상 상태에 도달하였다고 판단되면 값들을 읽어 기록한다.
- 7) 형상계수를 계산하기 위해 필요한 길이 (L)을 측정한다. (L=측정거리+83mm)
- 8) 차폐기의 위치를 일정한 간격으로 옮기며 실험을 반복한다.
- 9) 디지털 온도 조절계 ④를 적당히 조절하여 온도를 변화시키며 실험을 반복한다.
- 10) 전원을 OFF하고 시편이 냉각되기를 기다려 시편을 갈아 끼우고 위의 실험을 반복한다. (본 실험에서는 SUS304와 동판의 두 가지 시편을 사용한다.)
- 11) 측정값으로 기하학적 형상계수 (F_{12})를 계산한다.
- 12) 시편의 평균유효 방사율(각도 θ 에 대한 전방사율)을 계산한다.

4. 결과 및 고찰

Table 1는 원추 차폐부의 측정 길이가 증가함에 따라 식 (12)을 이용하여 계산한 형상계수에 관한 값에 대한 결과이다. 이때의 측정 길이가 증가함에 따라 형상계수는 일정하게 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5은 SUS304에서 원추 차폐부 측정 길이의 증가에 따른 방사율(emissivity)의 변화를 각 온도



No.	Name	No.	Name
1	시편가열부	5	온도지시계(T2)
2	온도설정계	6	복사계
3	밀리볼트미터	7	차폐부
4	온도조절계(T1)		

Fig. 4 Schematic diagram of radiator performance tester

Table 1 Shape Factor for length between radiometer and conical shield

원추 차폐부의 위치 L(mm)	형상계수 (Shape Factor)
150	0.028628
180	0.022609
210	0.018296
240	0.015104
270	0.012677
300	0.01079

별로 나타낸 그림이다. 원추 차폐부의 측정 길이가 증가할수록 방사율은 증가하고 시편가열부의 온도가 올라갈수록 방사율은 감소하며 그 간격은 급격하게 작아지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 SUS304에서 시편 가열부 온도의 증가에 따른 방사율의 변화를 원추 차폐부의 측정 길이의 값으로 나타낸 그림이다. 여기서는 원추 차폐부가 서모파일 근처로 갈수록, 즉 측정값의 길이가 짧을수록 낮은 방사율을 갖는 것을 볼 수 있다. 그리고 약 100~300℃ 사이에서 일률적으로 상당히 큰 방사율의 감소를 볼 수 있고 그 이상의 온도에서는 변화가 작음을 알 수 있다.

Fig. 7는 SUS304에서 원추 차폐부의 측정 길이의 증가에 따른 열손실의 변화를 나타낸다. 온도가 낮은 경우에는 길이의 변화에 따라 열손실의 변화가 거의 없지만 온도가 높아지면 길이가 증가함에 따라 열전달의 감소가 현저함을 보여준다.

복사장치를 이용한 온도와 형상계수의 변화에 따른 방사율에 관한 실험적 연구

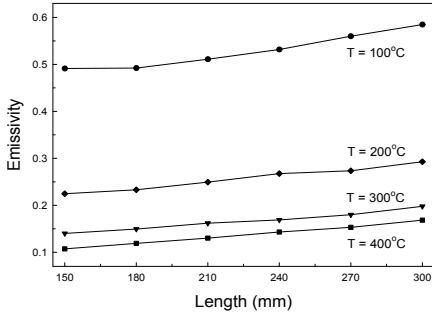


Fig. 5 Emissivity vs. the length between radiometer and conical shield (SUS304)

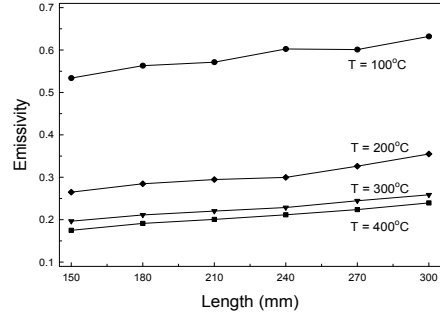


Fig. 8 Emissivity vs. the length between radiometer and conical shield (Copper)

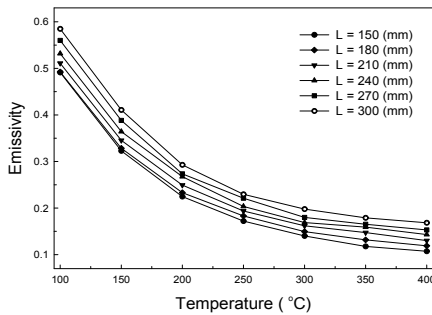


Fig. 6 Emissivity vs. temperature of specimen heating device (SUS304)

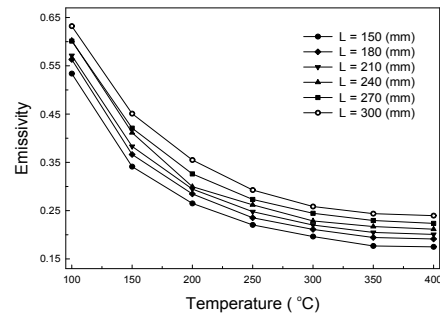


Fig. 9 Emissivity vs. temperature of specimen heating device (Copper)

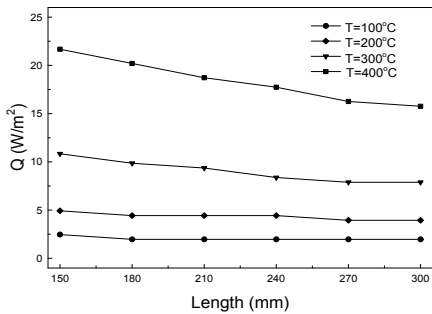


Fig. 7 Heat loss vs. the length between radiometer and conical shield (SUS304)

Fig. 8은 원추 차폐부 길이의 증가에 따른 동판의 방사율(emissivity)의 변화를 각 온도 별로 나타낸 그림이다. 여기서는 온도가 100°C일 때는 측정 길이가 증가할수록 계단 형태로 방사율이 증가하여 불규칙한 변화를 볼 수 있지만 다른 온도에서는 비교적 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 동판을 SUS304와 비교할 때 전체적으로 방사

율이 증가하는 것을 보여준다.

Fig. 9는 시편 가열부 온도의 증가에 따른 동판의 방사율의 변화를 원추 차폐부의 각 측정 길이의 값으로 나타낸 그림이다. 여기에서도 철판에서와 마찬가지로 원추 차폐부의 길이 측정값이 작을수록 낮은 방사력을 갖는 것을 볼 수 있다. 온도가 높아질수록 방사율은 처음에는 급격히 감소하다 서서히 감소하는 경향을 보여주는데 SUS304보다는 큰 값을 가진다.

Fig. 10은 동판에서 원추 차폐부의 측정 길이의 증가에 따른 열손실의 변화를 각 온도별로 나타낸 그림이다. 온도가 높은 경우는 경우(400°C) 측정 길이가 증가함에 따라 열손실이 약 20정도로 상당히 많이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 온도가 낮아짐에 따라 길이의 변화에 대한 열전달의 변화가 미미함을 보여준다.

5. 결론

본 연구는 열복사 실험 장치를 이용하여 형상계수와 온도변화에 따른 방사율과 열손실을 측정

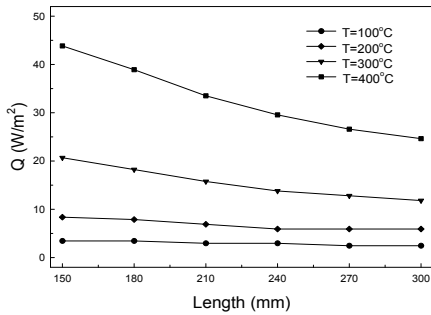


Fig. 10 Heat loss vs. the length between radiometer and conical shield (Copper)

함으로써 복사 열전달에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 원추 차폐부의 측정 길이가 증가함에 따라 형상계수는 일정하게 감소하고 SUS304와 동판 모두 열손실이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 두 시편 모두 낮은 온도에서의 변화는 거의 없고 약 300°C 이상의 고온에서 변화의 폭이 상당히 커짐으로서 복사의 특성인 고온에서 복사열전달이 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또 SUS304 보다 동판에서의 열손실이 약 1.5~2배 정도 크게 나타난다. SUS304와 동판 모두 원추 차폐부의 측정 길이가 증가함에 따라 방사율이 증가하며 두 시편의 방사율도 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 그러나 온도가 올라갈수록 방사율이 두 시편 모두 급격하게 감소한다. 시편 가열부의 온도가 올라감에 따라 두 시편 모두 방사율이 감소하며 이때에 낮은 온도에서 방사율은 급격히 감소하며 300°C 이상에서는 변화가 매우 미약하다. 또 원추 차폐부의 길이가 감소함에 따라 방사율은 매우 일정하게 감소함으로 형상계수에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Yunus A. Cengel, *Heat Transfer A Practical Approach*, International Edition, The McGraw-Hill Companies, 1998.
- [2] Frank P. Incropera and David P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th edition, John Wiley & Sons. Inc., 2002.
- [3] Robert Siegel and John R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 2nd edition, The McGraw-Hill Companies, 1981.
- [4] J. P. Holman, *Heat Transfer*, 8th edition, The McGraw-Hill Companies, 1997.
- [5] Kirk D. Hagen, *Heat Transfer with Applications*, International edition, Prentice Hall International Inc., 1999.